압전박막과 MEMS

윤운하, 류정호, 박동수 | 한국기계연구원

1. 서 론

이미 널리 알려진 바와 같이 MEMS는 기어, 밸브 등과 같은 기계적 부품과 센서, 엑츄에이터 및 전자회로가 모두 통합되어 있는 극소형의 지능형 시스템이라 할 수 있다. 즉, 온도, 압력, 속도, 전자기장 등과 같은 외부적인 자극을 감지하여 외부의 환경변화에 대항하는 운동(action)을 하게 된다. 실리콘 기판을 기반으로 하고 있는 반도체 공정기술의 눈부신 발달에 의하여 크기가 마이크로 단위인 기계부품은 물론이고 현재는 크기가 나노 단위인 기계부품도 가공할 수 있는 수준에 도달하고 있고, 전자회로의 초고집적화 기술은 MEMS에서 요구되고 있는 초소형, 고성능 전자회로를 구현할 수 있는 단계를 넘어서고 있다. MEMS의 마지막 구성요소인 센서와 엑츄에이터는 환경변화를 감지하고 운동을 할 수 있는 지능형재료로 제작되어야 한다. 그림 1은 노르웨이 SINTEF사의 Hendrik Rader에 의하여 작성된 자료(2006년 1월 5일 FUNMAT 세미나에서 발표된 자료)의 일부로 MEMS와 재료의 관계가 알기 쉽게 작성되어 있다. 그림 1을 보면, 지능형 재료로는 압전재료, 열전(pyroelectric)재료, 자왜재료 등이 사용될 수 있고, 재료의 선정은 MEMS의 역할에 따라 적합하게 선정할 수 있다. 이 가운데 압전재료는 전기장에 따라 역학적인 운동(역압전효과, converse effect)이 가능하고, 역학적인 자극에 따라 전하의 발생(정압전효과, direct effect)이 가능한 재료로서, 재료가 가지고 있는 우수한 특성으로 인하여 MEMS에 널리 사용될 수 있다. 압전재료의 특성을 간단하게 살펴보면, 1) 정압전 및 역압전효과에 의한 응답의 선형성이 매우 좋고, 2) 재료의 부피에 비하여 매우 큰 탄성에너지를 갖고 있으며, 3) 재료에서 음속이 빠르기 때문에 고속응답과 함께 응답의 대역폭이 넓고, 4) 넓은 역학변위 범위 및 주파수 범위의 진동을 발생시키거나 감지할 수 있다.[1] MEMS는 실리콘 공정기술과 함께 개발되어 온 기술이므로 MEMS에서 사용되는 압전재료는 필연적으로 막(film)형태를 갖게 된다. 이상적으로는 벌크형태의 압전재료와 같이 기판이 압전재료에 미치는 영향이 없으면 좋지만, 실제로는 기판에 따라 압전재료의 특성이 변화하는 것이 일반적이고, 압전재료의 재료조성 및 배향성에 따라서도 압전특성이 변화한다.[2-3] 또한 기판에 의한 클램핑, 잔류응력의 영향[4]도 크기 때문에 압전재료 자체 및 이의 제조공정에 대한 연구도 필요하지만, 실제 응용분야에 대한 이해가 병행되어야 최적화된 MEMS를 구현할 수 있다.

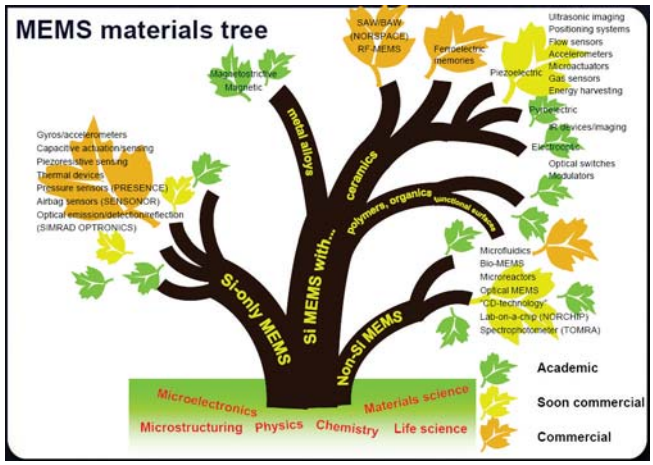

그림 1. MEMS와 지능형 재료

본 투고에서는 그림 1에 있는 많은 MEMS 가운데, 곧 상용화를 앞두고 있는 압전재료, 특히 PZT계열의 압전박막으로 제조되는 MEMS에 대하여만 간략하게 살펴보고자 한다.

2. MEMS 엑츄에이터

2.1 광학 거울

일상생활에서 접할 수 있는 광학거울(optical scanner 또는 mirror)은 대형 할인점 등에서 물품의 가격을 계산하는데 사용되는 바코드 판독기(barcode reader)에 내장되어 있다. 바코드 판독기의 동작원리는 그림 2와 같다. 그림 2와 같이 물품에 표시되어 있는 바코드를 레이저로 주사하여 디지털화된 출력값을 얻을 수 있다. 이 때 고정된 레이저빔을 요구되는 범위에서 주사할 수 있도록 하는 것이 광학거울이다. 그림 2와 같은 광학거울은 높은 분해능(바코드 사이의 간격)이 요구되지 않고 주사범위도 좁으며 단지 1차원만을 읽으면 된다. 그림 3은 바코드 판독기에 내장된 광학거울의 예를 나타낸다.[5] 이 광학거울은 자기장에 의하여 구동이 되도록 제작되었기 때문에 자기장의 세기를 변화시킬 수 있는 코일이 반드시 필요하게 된다. 따라서 MEMS에서 요구되는 소형화는 불가능하다는 단점이 있다. 그림 3의 광학거울은 최대 약 16° 정도의 반사각을 얻을 수 있고, 이때 코일에 요구되는 전류는 약 16mA로 알려져 있다.

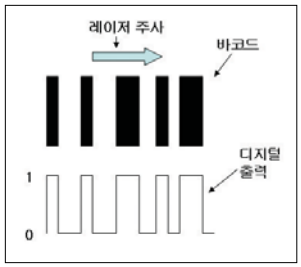

그림 2. 바코드 판독원리

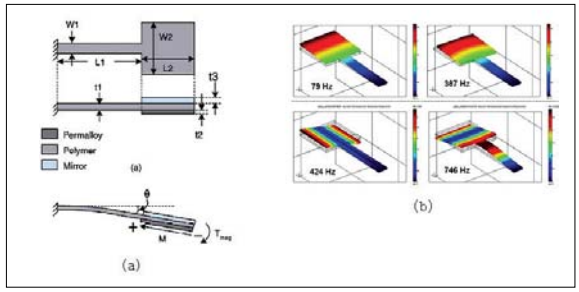

그림 3. 자기장 광학거울의 구조도(a) 및 동작특성(b)

그림 4는 Filhol 등에 의하여 제조된 광학거울로 PZT박막(두께 500nm, 반지름 3mm)을 이용하여 거울을 회전시킨다. 이 거울은 MEMS에서 요구되는 극소형(광학거울의 지름 ; 3mm, 힌지(hinge) 길이 ; 0.5mm, 힌지폭 ; 19.1㎛)으로 차세대 이동식 영상표시장치나 의료용 현미경으로 사용가능하다.[6] 그림 4의 광학거울은 주어진 교류전압에 따라 반원형 압전박막이 수직으로 변형을 일으키게 된다. 압전박막과 광학거울 사이에 전체 소자의 무게중심(center of mass)이 존재하게 하고, 거울의 중심과 압전박막의 중심을 서로 다르게 하여 거울을 회전시킬 수 있는 구조이다. 성능을 살펴보면, 전압이 41.4Vpp인 경우 약 40° 정도의 회전각을 가지며, 공진형으로 공진주파수는 25.4kHz이다. 실제 광학거울이 영상을 표시하려면 2차원 주사가 가능하여야 하나 현재는 1차원 주사용 광학거울이 대부분이고, 부분적으로 2차원 주사가 가능한 광학거울이 발표되고 있다. 한편, 설계적인 측면에서 이 거울이 최적화 되려면, 압전박막과 거울 사이의 무게중심 위치, 압전박막과 기판의 탄성비율(또는 두께 비율), 압전박막과 기판의 면적비율 등이 고려되어야 한다.

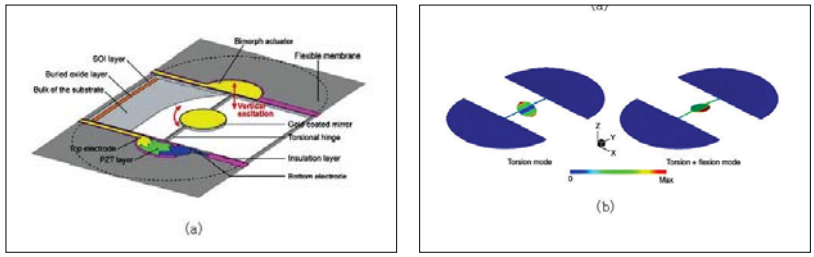

그림 4. 압전박막을 이용한 광학거울

그림 5는 그림 4와 같은 광학거울을 만드는 공정을 나타낸다. 그림 5와 같이 실리콘 기판을 기본으로 하여 여러 개의 층을 순서에 맞게 입혀야 하고, 또한 식각과 형상화 공정이 필요하다. 또한 PZT 박막의 경우, 박막이 입혀진 상태에서는 비정질(amorphous)상이므로 압전재료의 특성을 갖게 하려면 고온 열처리(500℃ 이상)가 필수적이다. 그러므로, 가격적인 측면에서 보면 공정의 단순화가 필수적이라고 할 수 있다.

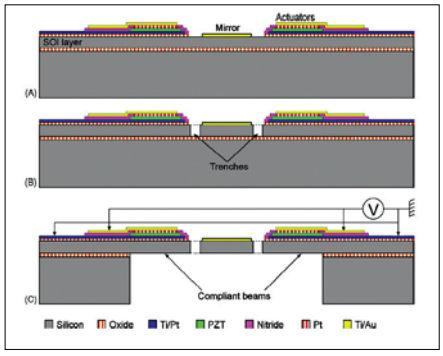

그림 5. 광학거울의 제조공정

그림 6은 2차원 주사가 가능한 광학거울로 정전기력을 이용하여 거울을 회전시킬 수 있으나, 회전각이 5° 정도에 불과하고, 그림 5와 같은 복잡한 실리콘 공정기술이 필요하다는 단점이 있다.[7]

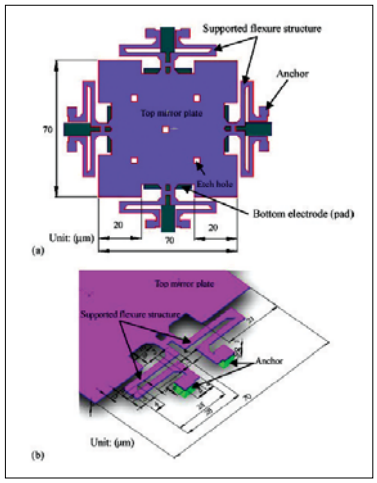

그림 6. 2차원 광학거울

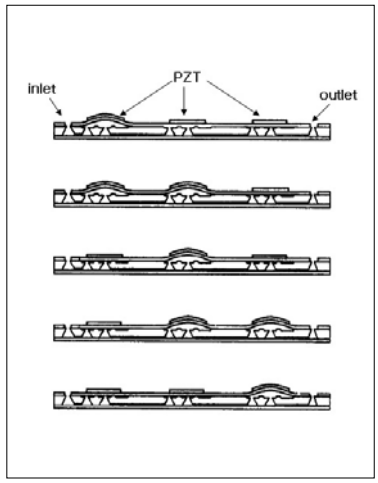

그림 7. 3상 압전펌프

2.2 마이크로 펌프

마이크로 펌프는 약물전달, 병리학연구 등의 의료용 유체이송 시스템이나 잉크젯 프린터의 헤드 등에 필수적인 요소이다. 압전재료를 사용한 마이크로 펌프는 일반적으로 응답이 빠르고, 스트로크가 비교적 크며 유체이송이 안정적이라는 장점이 있다. 그림 7은 단결정 압전벌크재료를 사용하여 제작된 마이크로 펌프의 초기모델의 동작방식을 나타낸다.[8] 그림 7과 같이 순차적으로 압전재료를 작동시켜서 유체를 이송하는 방식으로 작동주파수는 15Hz(전압, 80V)이고 유체이송량은 100㎕/min이다. 이 펌프는 저자[8]가 언급한 바와 같이 매우 고가의 펌프였다. 1) 우선 단결정 압전재료가 고가이고, 2) 압전재료와 펌프챔버는 접착제를 이용하여 수작업으로 접착하였기 때문에 펌프챔버와 압전재료의 중심이 설계와 조금만 벗어나도 작동이 불가능하였을 것이고, 3) 3상의 전원을 공급하기 위한 회로가 그리 단순하지 않기 때문이다. 그러므로, 진정한 의미의 MEMS 펌프라고는 할 수 없다.

그림 8은 그림 7보다 발전된 형상의 압전펌프를 나타낸다.[9] 이 펌프는 디퓨저와 노즐을 사용하여 밸브를 제거하였으며, 단상의 전원을 사용하여 압전재료를 굽힘진동시키는 방식으로 100Hz의 작동주파수에서 약 16ml/min의 유체를 이송할 수 있다. 그러나, 이 방식에서도 압전재료와 펌프챔버의 부착이 수작업으로 진행되어 실제 결과를 얻는데는 많은 시행착오가 있었을 것이다.

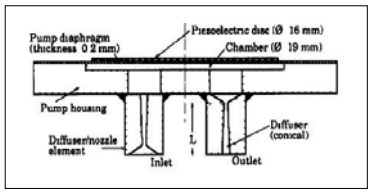

그림 8. 밸브없는 압전펌프

그림 9는 압전후막(thick film)을 만드는 공정 가운데 하나인 스크린 프린팅 방식으로 두께가 100㎛인 압전재료를 실리콘에 입혀서 만들어진 마이크로 펌프를 나타낸다.[10] 앞의 펌프들과 달리 이 펌프는 실리콘 공정기술을 기반으로 하고 있기 때문에 펌프챔버 위에 정확히 압전후막을 입힐 수 있었을 것이다. 이 펌프는 200Hz, 600Vpp

의 전압에서 120 ㎕/min 정도로 유체를 이송할 수 있다. 다른 압전펌프와 달리 MEMS화가 가능하다는 장점이 있으나, 스크린 프린팅 방식으로는 치밀한 압전재료를 얻을 수 없기 때문에 압전변형상수가 작게 되어 압전변형을 증가시키기 위해서 과도한 전압이 필요하다는 단점이 있다.

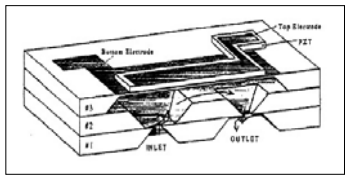

그림 9. 압전박막 마이크로 펌프

그림 10은 형상기억합금인 TiNi막(두께 6㎛)을 사용한 마이크로 펌프로 그림에서 보는 바와 같이 형상기억합금의 냉각/가열에 따른 변형을 이용하여 유체를 이송시킬 수 있다. 압전재료를 사용한 펌프와 달리, 작동주파수는 낮지만 변위량이 크고(약 95㎛) 압력이 높기(100kPa) 때문에 비교적 점도가 높은 유체의 이송에 적합하다.[11]

압전재료를 사용하여 우수한 성능을 갖는 MEMS 펌프를 구현하기 위해서는 우수한 성능의 압전박막을 제조할 수 있는 기술이 필수적이다. 또한, 앞에서 언급한 바와 같이 압전재료와 펌프챔버 재료 사이의 두께 비율 또는 면적비율, 압전재료의 형상, 압전재료의 변형을 효율적으로 사용할 수 있는 펌프의 기계적인 구조 등에 대한 연구가 병행되어야 할 것이다.

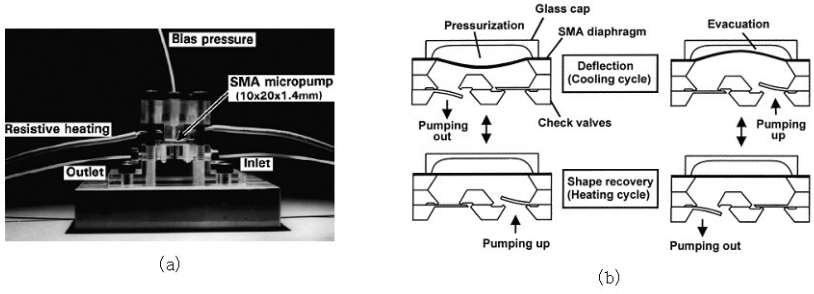

그림 10. 형상기억합금 마이크로 펌프

2.3 에너지 수집 MEMS

앞에서 언급한 마이크로 엑츄에이터와 달리 압전재료를 사용한 에너지 수집(energy harvesting)은 압전재료에 주어진 역학적인 에너지로부터 전기적인 에너지를 수집하는 것을 말한다. 최근의 전자회로기술로는 약 10-100 ㎼ 정도의 전력으로 회로의 구동이 가능한 저전력 전자소자를 양산할 수 있다. 대표적으로 적용가능한 소자는 항공기나 자동차 등의 구조건전성 감시용 센서소자, RFID 소자 등이고, 이 소자들이 주변으로부터 발생하는 진동에서 압전재료의 정압전효과를 이용하면, 소자를 구동시킬 수 있는 전력을 생산할 수 있다.[12] 그림 11은 MIT에 의하여 만들어진 에너지 수집 MEMS로 약 30㎼/cm^{2}을 생산할 수 있다. 그림 11에서 보는 바와 같이 주변의 진동, 바람 등에 의하여 프루프질량(proof mass)이 흔들리면 분극이 되어 있는 압전재료에 양면에 전하가 생성되어 전압차이가 발생하게 되면 전기에너지를 수집할 수 있게 된다. 그림 12는 미국 Metis Design사에 의하여 설계된 항공기의 지능형외피(smart skin)와 이 곳에 장착된 센서를 나타낸다. 그림 12의 센서는 압전센서의 일종으로 외피에

결함 등과 같은 비정상적 상태가 발생하면 이를 조기에 감지할 수 있다. 현재는 센서에서 검출된 신호를 처리하기 위하여 외부로부터 전원을 공급받는 형태이지만, 향후에는 그림 11과 같은 에너지 수집기를 일체화 하여 검출된 신호의 처리 및 신호의 전송을 무선으로 가능하도록 제작될 예정이다.

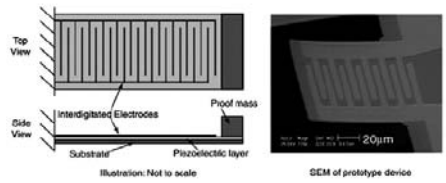

그림 11. MIT의 에너지 수집기

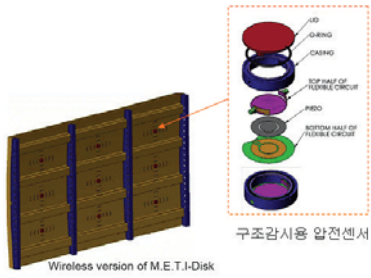

그림 12. Metis Design사의 스마트스킨

그림 11에서 보는 바와 같이 에너지 수집기는 매우 단순한 구조를 갖고 있다. 그러나, 실제로 이를 이용하여 전기/전자소자를 구동하는데 활용하려면 많은 문제점이 있다. 재료의 측면에서 보면, 압전전압상수는 유전율에 반비례하고, 압전변형상수에 비례하기 때문에 압전변형상수는 높고 유전율은 낮은 재료 또는 재료공정기술이 필수적이다. 일반적으로 압전재료에서 발생되는 전압은 매우 높고 전류는 낮으며 전기임피던스가 높기 때문에 압전재료에서 발생된 전기에너지를 효과적으로 변환시킬 수 있고 저장할 수 있는 전기/전자회로의 구성이 필요하다. 기구적으로는 압전재료에 주어지는 응력(stress)가 크면 발생되는 전기에너지가 크지만 압전재료가 견딜 수 있는 응력에는 한계가 있기 때문에 재료의 응력을 고려한 증폭기구의 설계가 필요하다.

3. MEMS 센서

3.1 가속도계

차량의 에어백(air-bag), 비행체 및 로봇의 자세제어, 정밀가공기기의 속도제어 등에 필수적인 요소가 가속도계이다. 압전재료는 온도에 대한 안정성 및 응답의 선형성이 우수하여 실리콘을 기반으로 하고 있는 가속도계에 널리 사용될 수 있다. 그림 13은 자기보정(self-validation)이 가능한 가속도계를 나타낸다.[13] 가속도를 감지하는 압전막은 스크린 프린팅법으로 제조되었고, 두께는 60㎛이고, 전체적인 크기는 4mm^{2}이고 자체중량은 17mg이며 1G에 대하여 400㎶의 전압을 발생시킨다. 가속도계의 작동은, 가속도계에 주어진 힘의 변화에 의하여 관성질량이 변형을 일으킴에 따라 압전막에 발생하는 전하를 계측하여 가속도를 측정할 수 있다. 이 가속도계에서는 4개의 축

(arm)에 있는 압전막이 센서와 엑츄에이터의 역할을 모두 수행하여 자기보정을 하게 된다. 즉, 3개의 축에 전압을 가하여 관성질량을 변형시키고, 이에 따라 발생된 전압을 나머지 축에서 관측하는 과정을 반복하여, 각 축 사이의 전압차이를 보상하도록 하는 방식이다.

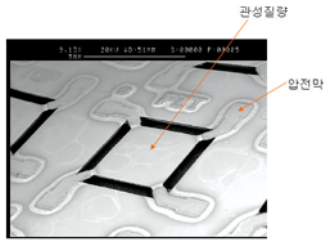

그림 13. 1축 가속도계

그림 13의 가속도계가 1축만을 감지할 수 있는 것에 비하여 그림 14는 3축의 감지가 가능한 가속도계를 나타낸다.[14] 그림 14에서 보는 바와 같이, 힘이 주어지는 방향에 따라 관성질량의 움직임이 변화하기 때문에 3축의 힘을 감지할 수 있다. 이 가속도계는 7.2mm^{2}의 크기를 가지고 있고, 작동주파수는 300Hz 까지이며, 압전막은 여러 번의 코팅공정을 사용하여 2㎛가 되도록 하였다. 이 가속도계가 비록 3축을 계측할 수 있다는 장점은 있지만, 압전막의 두께가 너무 얇기 때문에 관성질량의 변형에 따라 발생되는 전하의 크기가 8pC/G에 불과하다는 단점이 있다.

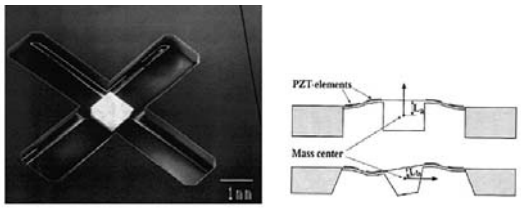

그림 14. 3축 가속도계

그림 13과 14의 가속도계를 비교하여 보면, 그림 13은 가속도의 변화를 매우 높은 전압(400μV/G)로 나타낼 수 있지만 1축만의 계측이 가능하고, 그림 14는 3축의 계측이 가능하지만, 가속도의 변화에 따라 매우 작은 전하(8pC/G)를 발생시킨다는 단점이 있다. 단지 재료적인 측면에서 보면, 두 가속도계에서 발생되는 전압(또는 전하)의 차이는 압전막의 두께(30배의 차이)에 있다. 공정으로 보면, 그림 13은 스크린 프린팅으로 제조되었기 두껍지만 치밀한 막을 얻을 수 없고, 그림 14는 코팅으로 제조되었기 때문에 치밀하지만 두꺼운 막을 만들기는 불가능하다. 즉, 상업적인 가속도계를 위해서는 두꺼우면서 치밀한 막을 제조할 수 있는 기술이 필요하다고 할 수 있다.

3.2 마이크로 초음파 센서

1차세계대전 이후 현재까지 초음파 센서는 군수, 의료 및 산업용에 매우 폭 넓게 사용되고 있다. 이들은 단순한 1차원만을 검사하는 센서로부터 현재는 3차원을 검사할 수 있는 센서까지 종류도 다양하다. 수 많은 용도만큼이나 매우 다양한 분야에 대한 연구가 수행되어 왔지만, 거의 대부분은 벌크(bulk)형 압전재료에 기반을 둔 연구이다. 벌크형 압전재료에 기반을 둔 초음파 센서는 몇가지 문제점이 있다. 먼저, 센서의 주파수는 압전세라믹 두께에

비례하기 때문에 고주파센서를 만들려면 센서의 두께를 매우 얇게 만들어야 하는데, 얇은 두께의 취성이 높은 압전세라믹을 다루기가 매우 어려워진다. 압전세라믹은 음향 임피던스(PZT의 경우 34MRayls)가 높기 때문에 인체, 유체(약 1.5MRayls) 등에서 효과적으로 에너지를 전달하려면 임피던스 정합층(matching layer)이 필요하다. 정합층의 임피던스에 맞는 재료를 구하는 것도 어렵지만, 정합층의 두께는 이론적으로 (파장/4)이므로 고주파 센서에서는 극히 얇은 정합층을 다루어야 한다는 문제도 있다. 마지막으로 2차원이나 3차원 주사를 위한 센서인 경우에는 압전세라믹을 주기적으로 배열시켜야 하는데, 이를 수작업으로 수행하므로, 매우 고가의 초음파센서가 될 수 밖에 없다. 이와 같이 벌크 압전세라믹 센서가 갖고 있는 문제점을 해결할 수 있는 것이 마이크로 초음파센서이다. 그림 15는 대표적인 마이크로 압전세라믹센서의 개략도를 나타낸다. 그림 15에서 센서의 공진주파수는 압전세라믹의 두께 보다는 기판의 구조 및 두께에 더욱 의존한다. 즉, 기판의 기하학적 구조를 조절하여 센서의 공진주파수를 맞출 수 있을 뿐 아니라, 피검체와의 임피던스 정합도 해결할 수 있다.[15]

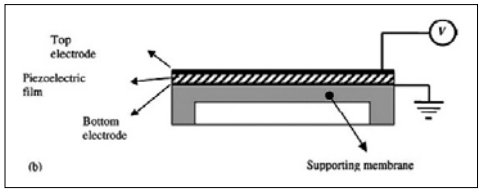

그림 15. 마이크로 초음파센서

그림 16은 각 압전막의 크기 1.5×1.5mm², 두께는 10㎛이내에서 조절하여 공진주파수가 40-160kHz인 2차원 주사형 초음파센서를 나타낸다.[16] 여기서 압전막은 대부분이 후막을 얻기 위하여 사용하는 스크린 프린팅 대신에, 졸겔(sol-gel)법을 반복적으로 사용하여 얻었다.

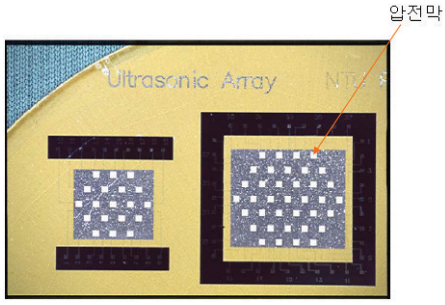

그림 15. 마이크로 초음파센서

4. 맺음말

압전박막을 사용한 MEMS에 대하여 몇가지 예를 들어 살펴보았다. 비록 몇가지 예에 불과하지만, 압전박막으로 제작될 수 있는 MEMS는 다양하며, 미래에는 더욱 많은 종류의 MEMS가 압전박막으로 만들어질 것이다. 기본적으로는 매우 치밀하고 고성능 압전박막을 얻는 것이 어느 경우에나 필수적이고, 두께 범위는 응용에 따라 다르지만, MEMS에서 요구되는 압전박막의 두께는 수십 ㎛ 범위라고 할 수 있다. 전체적인 압전소자(piezoelectric device)의 측면에서는 변위 또는 전압을 증폭시킬 수 있는 기판의 구조 설계, 효율적인 에너지 변환 또는 통신을

위한 압전박막과 전기/전자회로 사이의 전기/음향적 정합, 응용에 따라 최적화된 응답을 얻기 위한 압전박막의 기하학적 구조설계 등이 필요하다. 즉, 재료 또는 재료공정기술과 함께 압전소자의 설계/해석기술이 병행되어야 시장에서 경쟁력을 갖는 최적화된 압전박막 MEMS를 양산할 수 있다.

⚜ 참고 문헌

[1] N. Setter ed., Piezoelectric Materials in Devices, 2002, Ceramics Lab., EPFL

[2] S. Dunn & R.W. Whatmore, Substrate effects on the domain structures of PZT 30/70 sol-gel films via PiezoAFM, J. Euro. Ceram. Soc., pp. 825-833, 2002

[3] N. Ledermann et al., {100}-Textured, piezoelectric Pb(Zrx, Ti1-x)O3 thin film for MEMS : integration, deposition and properties, Sen. & Actu. A 105, pp.162-170, 2003

[4] S. Lee et al., Residual stress influences on the sensitivity of ultrasonic sensor having composite membrane structure, Sen. & Actu. A 125, pp.242-248, 2006

[5] A. Yalcinkaya et al., Polymer magnetic scanners for bar code applications, Sen. & Actu., article in press

[6] F. Filhol et al., Resonant micro-mirror excited by a thin film piezoelectric actuator for fast optical beam scanning, Sen. & Actu. A, pp.483-489, 2005

[7] Y.C.Cheng et al., A MEMS micromirror fabricated using CMOS post-process, Sen. & Actu. A, pp.573-581, 2005

[8] Jan G Smits, Piezoelectric Micropump with Three Valves Working Peristaltically, Sen. & Actu. A21-A23, pp.203-206, 1990

[9] E. Stemme, G. Stemme, A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump, Sen. & Actu. A, pp.159-167, 1993

[10] M. Koch et al., A novel micromachined pump based on thick-film piezoelectric actuation, Sen. & Actu. A, pp.98-103, 1998

[11] E. Makino et al., Fabrication of TiNi shape memory micropump, Sen. & Actu. A, pp.256-262, 2001

[12] http://web.mit.edu/aeroastro/www/people/wardle/documents/duToit_ms_2. doc.pdf

[13] S. P. Beeby et al., Microprocessor implemented self-validation of thick film PZT/silicon accelerometer, Sen. & Actu. A, pp.168-174, 2001

[14] K. Kunz et al., Highly sensitive triaxial silicon accelerometer with integrated PZT thin film detectors, Sen. & Actu. A, pp.156-160, 2001

[15] F. Akashen et al., Development of piezoelectric micromachined ultrasonic transducers, Sen. & Actu. A, pp.275-287, 2004

[16] Z. Wang et al., Micromachined thick film piezoelectric ultrasonic transducer array, Sen. & Actu. A, pp.485-490, 2006

윤 운 하

· 한국기계연구원 재료기술연구소 미래기술연구부 선임연구원
· 관심분야 : 압전소자 설계 및 평가
· E-mail : uhyoon@kmail.kimm.re.kr

류 정 호

· 한국기계연구원 재료기술연구소 미래기술연구부 선임연구원
· 관심분야 : 지능형재료 및 소자
· E-mail : jhryu@kmail.kimm.re.kr

박 동 수

· 한국기계연구원 재료기술연구소 미래기술연구부장
· 관심분야 : 신코팅공정,기능성 후막코팅
· E-mail : pds1590@kmail.kimm.re.kr